

ВОЗМОЖНОСТИ ДАЛЬНЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В ПЗК ГЛУБОКОВОДНЫХ РАЙОНОВ ЧЕРНОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ЗВУКА

Б.К. Богушевич, Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа

Отделение гидроакустики МГИ НАН Украины, г. Одесса, Украина

Рассматриваются вопросы распространения звука в подводном звуковом канале (ПЗК) Черного моря в условиях изменчивости профиля скорости звука (ПСЗ), вопросы изменчивости характеристик принимаемых сигналов и построения акустических информационных систем.

Questions of a sound propagation in Black sea underwater sound channel in conditions of variability of a sound velocity structure, questions of variability of characteristics of received signals and designing of acoustic information systems are considered.

Условия распространения звука в ПЗК и формирование большого числа лучей между точками излучения и приема обеспечивают большой уровень принимаемого сигнала – результат суммирования сигналов отдельных лучей. И чем ближе к оси канала размещаются излучатель и приемник, тем больше число лучей, тем больше уровень результирующего сигнала. Но изменчивость характеристик ПСЗ, и в первую очередь глубины залегания оси канала, при неизменной глубине размещения излучателя и приемника будет приводить к значительным изменениям условий распространения, характеристик и уровня принимаемого сигнала. Работа ставит целью выявить изменчивость характеристик принимаемого сигнала при всех возможных изменениях ПСЗ и фиксированном положении излучателя и приемника.

Изменчивость условий распространения и характеристик принимаемого сигнала рассматривались при использовании 52 профилей из базы данных ОГА МГИ, снятых в разные годы в разные сезоны в точке материкового склона с координатами 44°00' с.ш., 31°00' в.д. Сравнение указанных 52-х ПСЗ с более чем 200-ми профилями, снятыми в других точках континентального склона, показало, что изменчивость характеристик первых практически полностью покрывает изменчивость характеристик последних. Это позволяет на их основе с достаточной точностью описывать изменчивость условий распространения и временной структуры сигнала и в других районах материкового склона. Для анализа особенностей ПСЗ, расчета лучевых траекторий, расчета времен распространения по лучам и анализа временной структуры сигналов при многолучевом распространении из первоначальных 52-х профилей были отобраны 16, для всех четырех сезонов с максимальными отклонениями от усредненного профиля сезона (рис. 1).

На достаточно больших расстояниях из-за пространственных и временных флуктуаций параметров морской среды фазы сигналов отдельных лучей в значительной степени случайны и тонкая интерференционная структура звукового поля либо не наблюдается, либо не сопоставима с расчетами [1,2]. Поэтому целесообразным представляется энергетический подход к расчету звукового поля, когда определение силы звука производится путем некогерентного сложения сигналов отдельных лучей (сложение интенсивностей сигналов) [1,2]. Энергетический подход позволяет просто определять усредненное значение силы звука. Но при этом теряется интерференционная структура звукового поля. В то же время бесспорным является существование до определенных дальностей интерференционной структуры поля и справедливость подхода, основанного

на когерентном (с точностью до фазы) сложении сигналов лучей при получении результирующего сигнала [3]. В экспериментальных работах интерференционная структура поля устойчиво регистрировалась на расстояниях в сотни километров при значении частот сигналов сотни герц [4]. Поэтому в рассматриваемой задаче для случая расстояний $r \sim 500$ км в первую очередь будем ориентироваться на усредненные значения поля. В то же время будем проводить расчеты «с точностью до фазы», имея ввиду их «определенную» справедливость.

Качество или «сила» звукового канала определяются отношением энергии, захватываемой каналом, к полной излучаемой энергии, т.е. интервалом углов выхода лучей, захватываемых каналом, и характеризуется коэффициентом захвата [1,2]

$$K = W_{\kappa} / W_0 = \sin \chi_{\kappa} \approx \chi_{\kappa} = \sqrt{2\Delta C / C_u} = \sqrt{2(C_{\text{зк}} - C_u) / C_u}, \quad (1)$$

где χ_{κ} - угол выхода луча, имеющего точку заворота на границе канала $z_m = z_{\kappa}$;

C_u - значение скорости звука на горизонте размещения излучателя;

$C_{\text{зк}}$ - значение скорости звука на границах канала.

Выражение (1) позволяет давать оценку энергетических возможностей ПЗК с разными ПСЗ и выбирать оптимальные глубины размещения излучателя z_u . Чем больше разница $\Delta C = C_{\text{зк}} - C_u$, тем сильнее канал. Из этого следует, что разницу значений скорости звука на границах и на оси канала $C_{\text{зк}} - C_0$ желательно иметь больше, а излучатель желательно размещать ближе к оси канала. В рассматриваемой задаче района континентального склона глубина моря принята $H \geq 200$ м и для всех ПСЗ (рис. 1) нижняя граница канала определяется дном с практически одинаковым и не зависящим от сезона значением скорости звука $C_{\text{зк}} = C_{\text{дн}} \approx 1472$ м/с. При этом эффективность канального распространения будет определяться тем, насколько значение C_u меньше этой величины. Минимум СЗ в разные сезоны находится в интервале значений от 1455 до 1462 м/с и в интервале глубин от 50 до 85 м. Наибольшую в условиях всех сезонов величину ΔC можно получить, выбирая $z_u = 55 \dots 70$ м и обеспечивая $C_{\text{мин}} \leq 1463$ м/с. При этом достигаемой является величина $K = \chi_{\kappa} = 0,11$, т.е. по каналу может распространяться до 11% излучаемой энергии. В наиболее благоприятных условиях $C_{\text{мин}} = 1455$ м/с эта величина составит 15,2%. С увеличением глубины моря и $C_{\text{зк}} = C_{\text{дн}}$ коэффициент захвата будет расти.

При исследовании ПСЗ и условий канального распространения важным является вопрос временной структуры принимаемого сигнала – интервал времени прихода сигналов всех лучей T , интервалы времени между соседними сигналами ϑ_i , число сигналов. Величина T важна при выборе длительности элемента сигнала T_s , информационной системы и задании скорости передачи информации. Величина ϑ_i определяет разность фаз соседних сигналов и условия их векторного суммирования, влияет на выбор длины волны используемого сигнала. В идеализированных волноводах (например, линейный ППЗК или билинейный ПЗК) эти величины определяются [2]:

$$\vartheta_{(N)} = t_{(r, N+1)} - t_{(r, N)} = (a^2 \cdot r^3 / 24C_0) \cdot (2N + 1) / ((N + 1)^2 \cdot N^2), \quad (2)$$

$$T = t_{(r, N_{\text{мин}})} - t_{(r, N_{\text{макс}})} = (a^2 \cdot r^3) / 24C_0 \cdot N_{\text{мин}}^2 \geq a \cdot z_{\text{сп}} \cdot r / 3C_0, \quad (3)$$

где N - число циклов траектории;

z_{zp} - глубина нижней границы канала;

C_0 - значение скорости звука на горизонте источника;

$a = g / C_0 = \Delta C / \Delta z \cdot C_0$ - относительный градиент скорости звука.

В случае произвольных профилей эти величины определяются расчетами на ЭВМ.

Для получения временной структуры сигнала при многолучевом распространении для каждого из выбранных ПСЗ на ЭВМ рассчитывались все разрешенные лучи (т.е. лучи, выходящие из точки излучения и приходящие в точку приема), значения углов выхода и прихода, время распространения по каждому из лучей, разница времен распространения сигнала данного луча относительно сигнала, приходящего последним. Вычислялась также векторная сумма сигналов всех лучей для задаваемого значения их частоты (из предположения равенства амплитуд сигналов отдельных лучей). Глубина точек излучения и приема принята равной 55 м и выбиралась таким образом, чтобы при любых возможных изменениях ПСЗ сохранялись условия канального распространения. С целью уменьшения объемов и времени счета вычисления проводились для расстояния $r = 50$ км. Для других, больших расстояний, при неизменном по трассе профиле лучевая и временная структуры распространения будут меняться строго определенным образом – удвоение расстояния будет приводить к удвоению числа разрешенных лучей, удвоению разницы времен прихода первого и последнего сигналов и сохранению неизменности интервалов прихода сигналов лучей с определенной глубиной заворота.

Результаты расчетов для 11 профилей представлены в таблице 1. Таблица отражает общее число сигналов лучей и интервалы времени, в которые попадают 20, 30, 40, 50 и 70% от общего числа N сигналов, даны значения амплитуд результирующего сигнала – векторной суммы сигналов всех N лучей для случая частоты сигнала $f_c = 1000$ Гц.

Таблица 1 – Временная структура многолучевого распространения сигналов в ПЗК

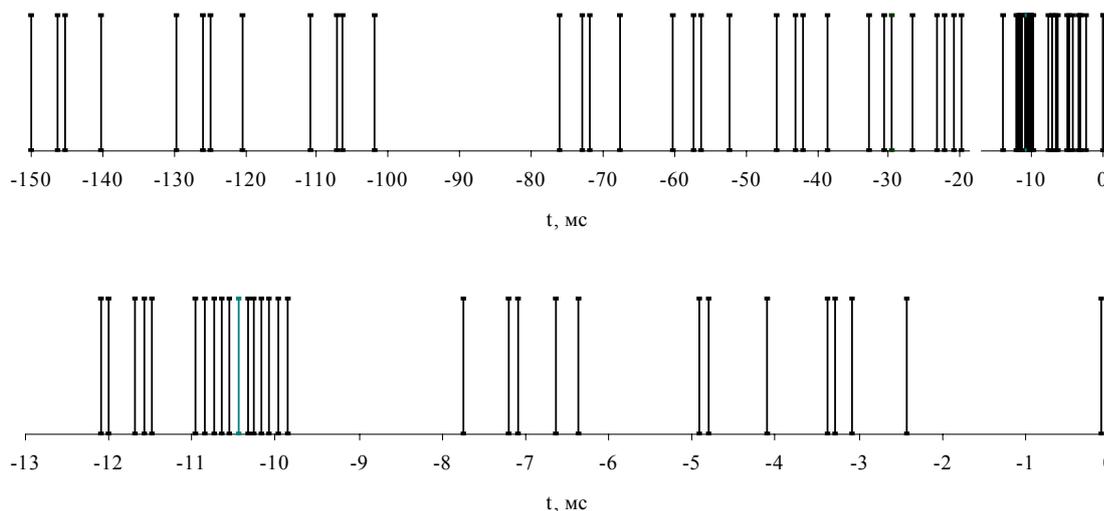
Дата измерения ПСЗ	Число лучей, N	Δt (100% от N), мс	70% от N	Δt (70% от N), мс	50% от N	Δt (50% от N), мс	40% от N	Δt (40% от N), мс	30% от N	Δt (30% от N), мс	20% от N	Δt (20% от N), мс	Амплитуда результир. сигнала ($f = 1000$ Гц)
17.12.89	67	69.63	47	22.5	34	15.1	27	11.2	20	8.2	13	4.1	12
31.01.93	217	211.7	152	25.3	108	15.1	87	10.3	65	6.3	43	3.7	16.8
11.04.74	74	19.5	52	4.7	37	3.4	30	3.1	22	3.0	15	2.8	7.2
23.05.85	212	225.6	148	47.8	106	17.3	85	11.0	64	6.6	42	3.6	6.4
26.05.92	65	150.2	46	52.3	33	17.7	26	10.2	20	10.2	13	7.1	16.2
09.07.83	109	93.1	76	23.1	55	21.7	44	21.1	33	20.2	22	17.6	6.2
22.07.86	149	189.6	104	49.8	75	11.1	60	8.4	45	6.1	30	5.0	10.0
14.09.86	205	188.1	144	34.7	103	12.5	82	8.1	62	5.0	41	2.7	11.0
13.11.78	128	37.8	90	6.5	64	3.1	51	1.8	38	1.1	26	0.6	6.0
25.11.89	141	116.4	99	11.1	71	10.5	56	9.2	42	7.5	28	5.1	10.5
15.11.86	439	134.9	307	2.1	220	0.6	176	0.39	132	–	88	–	100.8

Наиболее благоприятны условия распространения в случае ПСЗ от 15.11.86, у которого глубина залегания оси канала близка глубине размещения излучателя и приемника. Здесь существует 439 сигналов разрешенных лучей, причем 70% их числа (307) попадают во временной интервал $\Delta t = 2,1$ мс. Почти 50% числа сигналов попадает во временной интервал $\Delta t = 0,5$ мс, равный половине периода сигнал $f_c = 1,0$ кГц, что обеспечивает большую величину результирующего сигнала – 100,8.

Для других профилей условия распространения менее благоприятны – число сигналов лучей от 217 до 65, интервал времени, в который попадают 70% числа сигналов, от 4,7 до 52 мс, в интервал времени 0,5 мс попадает менее 20% числа сигналов и уровень результирующего сигнала не более 16,8.

Наихудшие условия распространения в случае ПСЗ от 26.05.92 – число сигналов лучей $N = 65$, интервал времени прихода 70% числа сигналов $\Delta t_{(70\%)} = 52,3$ мс, число сигналов в этом интервале $N_{(70\%)} = 46$. Этот профиль будет определять наихудшие условия распространения в ПЗК рассматриваемого района.

Более подробно временную структуру сигнала раскрывают временные диаграммы. Одна из них для случая ПСЗ от 26.05.92 приведена ниже.



Из диаграммы видно, что сигналы лучей плотно группируются в интервалах времени 9,8...11,0 мс (12 сигналов) и 11,5...12,1 мс (5 сигналов), что в большой степени определяет значение (16,2) вектора результирующего сигнала.

При построении информационных систем длительность элемента сигнала T_s можно выбирать большей, чем интервал времени прихода всех сигналов лучей $T_s \geq \Delta t_{(100\%)}$ (в ПСЗ от 26.05.92 $T_s \geq 150$ мс). При этом можно использовать энергию всех лучей. Но скорость передачи информации при этом будет низкой. Если принимать $T_s \geq \Delta t_{(70\%)}$ (в ПСЗ от 26.05.92 $T_s > 52$ мс) используется только 70% энергии сигналов лучей. Но скорость передачи информации при этом возрастает почти в три раза.

Для оценок возможностей дальней акустической связи в наихудших условиях канального распространения принимаем для расстояния $r = 50$ км:

- при $T_{э,со} = 160$ мс $N_l = 65$ и ожидаемое увеличение уровня сигнала в точке приема из-за многолучевости распространения $\sqrt{N_l} = 8,1$ (18,1 дБ);

- при $T_{э,со} = 55$ мс $N_l = 46$ и $\sqrt{N_l} = 6,8$ (16,6 дБ).

Для расстояния 500 км показатели будут следующими:

- при $T_{э,со} = 1,6$ с $N_l = 650$ и $\sqrt{N_l} = 25,5$ (28,1 дБ);

- при $T_{э,со} = 0,55$ с $N_l = 460$ и $\sqrt{N_l} = 21,4$ (26,6 дБ).

При принимаемом значении мощности излучаемого сигнала $P_a = 10$ Вт и ненаправленном излучателе давление сигнала на его оси на расстоянии 1 м составит 10^3 Па. При частоте сигнала $f = 0,5$ кГц, расстоянии $r = 500$ км, полосе приема $\Delta f_{np} = 0,6$ и 1,8 Гц, спектральном уровне шумов среды $1,8$ мПа/ $\sqrt{\text{Гц}}$ (соответствует ветру 5...6 баллов – 10 м/с – в течение ~80% времени года сила ветра не превышает этой величины) давление шума в полосе приема будет составлять 1,4 мПа и 2,4 мПа. Потери на затухание при распространении, при коэффициенте затухания $\beta_{0,5} \leq 0,03$ дБ/км, не будут превышать 15 дБ (5,6 раза). Потери на расширение фронта волны луча $500 \cdot 10^3$ раз. Увеличение амплитуды результирующего сигнала из-за многолучевости распространения 25,5 и 21,4 раза. Итоговые отношения сигнал/шум в точке приема для $T_s = 1,6$ с и $T_s = 0,55$ с составят 6,5 (16,4 дБ) и 3,2 (10,1 дБ). При этом скорость передачи информации ~0,6 и ~1,8 бит/сек.

ВЫВОДЫ

Для трассы длиной 500 км и всего многообразия профилей скорости звука число сигналов лучей изменяется от 650 до многих тысяч. Увеличение амплитуды результирующего сигнала, по сравнению с амплитудой сигнала одного луча (при частоте сигнала $f = 1000$ Гц), от 25 до тысячи раз, скорость передачи информации от 0,6 бит/сек до 50 бит/сек. При акустической мощности излучаемого сигнала 10 Вт дальность функционирования информационных систем не менее 500 км.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.М. Бреховских. Элементы теории звукового поля в океане. //Акустика океана. – М.: Наука, 1974. – С. 79-162.
2. Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов. Акустика океана //Океанология. Физика океана. Т.2. – М.: Наука, 1978. – С. 49-145.
3. И. Толстой, К.С. Клей. Акустика океана. – М.: Мир, 1969. – 298 с.
4. С.Д. Чупров. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. // Акустика океана. Современное состояние. – М.: Наука, 1982. – С. 71-91.

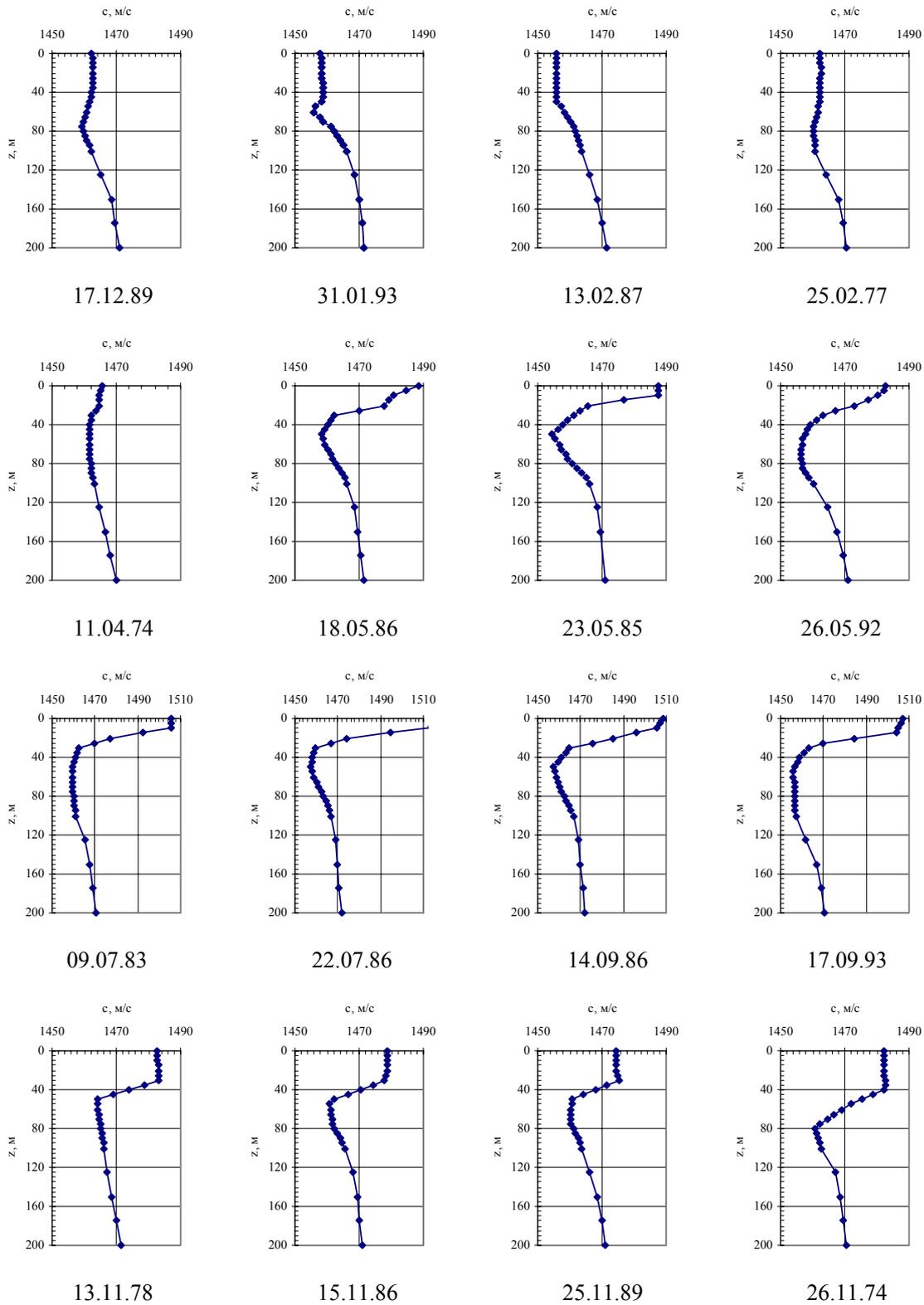


Рис. 1